模块化安装光伏组件接线盒的结构设计与运维效率研究

王　斌

中节能大荔光伏农业科技有限公司 陕西 渭南 715100

【摘　要】：传统光伏组件接线盒拆装易损伤组件、运维效率低、故障处理成本高，本文设计底座固定、主体可拆、上盖快开的三层分离式模块化接线盒，围绕核心部件低损耗、快更换、高可靠需求优化设计，新增防水稳固型螺纹式 MC4 插头并实现与接线盒一体化集成，制定标准化运维流程与安全规范，对比其与传统接线盒的运维效率、组件损伤率及长期稳定性。该模块化接线盒可实现故障单元独立更换，单块组件拆装时长缩短 70%以上，组件损伤率降至 0，人工成本降低 75%，长期运行失效率控制在 0.2%以下，适配多场景应用，有效提升光伏组件运维效率与全生命周期收益，为光伏电站运维优化提供技术支撑。

【关键词】：模块化光伏接线盒；结构设计；运维流程；效率对比；组件保护

DOI:10.12417/2811-0528.26.14.096

1 模块化光伏组件接线盒结构设计

1.1 模块化接线盒整体结构方案

模块化光伏组件接线盒采用底座固定、主体可拆、上盖快开的三层分离式整体架构，底座选用高强度改性 PBT 材质，与组件背板永久粘接，承担结构固定与密封基底功能。主体模块集成导电与保护单元，通过标准化接口与底座达成电气与机械双重连接，上盖采用旋转卡扣式密封结构，满足 IP67 防护等级，可徒手快速开启。创新集成防水且稳固的螺纹式 MC4 公母头，实现插头与接线盒本体一体化设计，从结构根源提升连接可靠性与防水性能方案针对旧组件接线盒更换中剥离易损背板的问题，将固定与可更换部分解耦，避免拆装损伤 TPT 背板与 EVA 层，适配多晶硅、单晶硅等主流组件背板规格（见图 1）。海南高湿、沿海盐雾、西北高温等场景已实现工程应用，相较传统一体式接线盒，可实现故障单元独立更换，不破坏组件本体结构。

图 1 接线盒形象图

1.2 模块化接线盒核心部件设计

核心部件围绕低损耗、快更换、高可靠设计，导电模块采用加厚紫铜镀锡一体化汇流片，接触电阻控制在 0.5mΩ 以内，削减大电流工况下功率损耗[1]。旁路保护采用中置式模块化二极管单元，选用 SiC 肖特基二极管，正向压降低于 0.1V，热损耗较传统器件降低 60%以上，适配 182mm、210mm 大尺寸组件电路保护。端子连接采用按压自锁式快接结构，替代传统螺钉紧固，插拔寿命超 1000 次，防呆定位槽可避免正负极接反。密封部件采用双道氟橡胶圈与导流槽结构，解决高湿环境凝露与积水难题，内部灌封导热凝胶兼顾绝缘与散热，将工作结温控制在安全区间。防水螺纹式 MC4 插头作为核心外接部件，采用 NPT 内外螺纹密封腔体+IP68 级环形防水圈+紧固电缆压片复合结构，坚固抗变形、密封不渗水，大幅降低接头烧毁、短路故障风险。核心部件均采用标准化尺寸，可同规格模块互换，削减备品备件管理成本。

1.3 模块化接线盒安装接口设计

安装接口采用定位导向、机械锁紧与电气导通一体化设计，底座预设与组件引出线匹配的穿线孔与定位凸台，保障主体模块安装一次对准。机械接口采用弹性卡锁结构，插入到位自动锁紧，拆卸时按压解锁键即可分离，无需工具辅助。电气接口采用弹片式弹性接触，振动与温度循环工况下连接稳定，接触电阻波动小于 3%。接口外围设置绝缘隔离筋与防水围堰，防范水汽侵入与爬电风险，尺寸遵循 IEC 62790 标准，兼容一体化集成的螺纹式 MC4 防水插头，实现与组件、线缆系统无缝对接。该接口设计已在江苏海天、快可光伏等模块化产品中落地，适配 1500V 高压系统，满足集中式与分布式光伏电站通用安装要求。

2 模块化接线盒运维操作流程与方法

2.1 模块化接线盒快速拆装流程

模块化接线盒快速拆装以无损伤、高效率为核心，拆卸需

断开组件直流侧开关并验电确认无压，徒手旋转解锁上盖，按压主体模块解锁键，垂直向上分离主体与底座。无需剥离底座、清理残胶或熔解焊锡，可避免划伤背板与损伤电池片（见图 2）。安装时将新主体模块沿定位导向插入底座，听到卡锁声响即完成机械与电气连接，同步确认一体化螺纹式 MC4 插头密封与紧固到位，扣合上盖并确认密封到位[2]。全程单人徒手可完成，单块组件拆装时间控制在 5 分钟内，较传统拆卸旧盒、清理背板、重新粘接流程缩短 70%以上。海南尖峰岭旧组件翻新、青海海南州 200MW 电站运维中，均验证该流程稳定可行，有效规避旧接线盒强行剥离导致的组件失效问题（见图 3）。

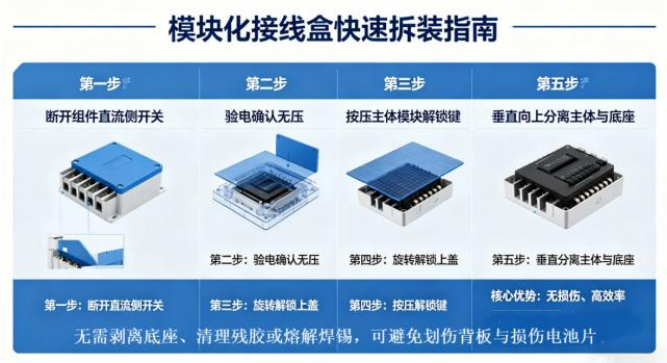

图 2 模块化接线盒快速拆装图

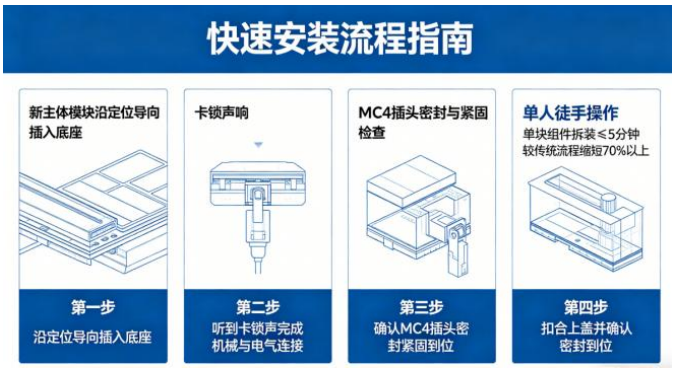

图 3 模块化接线盒快速安装图

2.2 模块化接线盒故障检测与更换方法

故障检测采用外观巡检、红外测温、电气测试三级判定流程，目视检查盒体开裂、密封失效、线缆老化等外观缺陷，再用红外热成像仪检测端子与二极管区域，温差超过 8K 判定为接触不良或二极管失效。通过 IV 曲线测试仪测量组件输出参数，对比额定值判断接线盒导通损耗，定位故障后仅更换主体模块，无需处理底座与引出线。旧组件中接线盒锈蚀、密封失效等典型故障，更换后功率恢复率可达 98%以上，宿迁供电公司分布式光伏项目应用该方法，故障定位与更换时长从传统 40 分钟降至 8 分钟，大幅降低停机发电损失。

2.3 模块化接线盒运维安全规范

运维操作严格执行停电、验电、接地、挂牌、上锁五步安全法，禁止带电插拔模块与螺纹式 MC4 防水插头。作业环境温度控制在-40℃~85℃，雷雨、大风等恶劣天气需停止户外操作。拆装保持垂直插拔，禁止侧向撬动，防止底座变形。更换后检查密封到位、绝缘电阻大于 20MΩ，确认螺纹式 MC4 插头旋紧密封，方可恢复运行。定期运维每 6 个月开展密封检查与红外测温，高湿、盐雾地区缩短至 3 个月。所有操作遵循 GB/T 37410、IEC 62790 标准，运维人员需持低压电工证上岗。该规范在青海、越南等电站规模化应用，未发生安全事故与二次损伤问题。

3 模块化接线盒运维效率对比分析

3.1 运维时长与人工成本对比

传统接线盒更换需拆卸旧盒、清理残胶、焊接引线、固化密封，单块耗时约 30-40 分钟。模块化方案仅更换主体模块，一体化螺纹式 MC4 插头无需单独拆装单块耗时控制在 5 分钟以内，效率提升 6 倍以上。100MW 电站年度运维测算，传统方案需 15 人·月工时，模块化方案降至 3 人·月，人工成本降低 75%。旧组件翻新场景中，保留底座加装新模块，较完全剥离旧盒工时减少 65%。海南旧组件试验数据显示，模块化运维单块人工成本从 28 元降至 6 元，大规模应用经济效益显著。

3.2 组件损伤率与运维质量对比

传统光伏组件拆卸工艺主要依靠刀片手动剥离旧接线盒，操作过程中极易划伤 TPT 背板、撕裂 EVA 封装层，对组件本体造成不可逆损伤[3]。经试验统计，该方式下组件损伤率高达 3.14%，严重影响组件翻新后的可靠性与使用寿命。模块化更换方案则全程不接触组件底座与背板，一体化防水螺纹式 MC4 插头从源头降低接头故障与渗水风险，从操作路径上规避了机械损伤，组件损伤率可直接降至 0。在旧组件翻新试验中，采用保留旧盒基础上加装新模块的工艺可实现零损伤；而采用完全去除旧盒的传统工艺则出现 5 块组件损坏。模块化设计从结构根源上消除了物理损伤风险，经实测，组件更换后峰值功率提升 1.8%—3.25%，与旧组件性能试验结论高度吻合。同时，该方案密封性能、导电稳定性一次合格率达 99.7%，整体运维质量与工艺稳定性显著优于传统拆卸工艺。

3.3 长期使用运维稳定性分析

模块化接线盒核心部件可独立更换，无需因单一元件失效更换整盒，一体化螺纹式 MC4 插头耐盐雾、抗老化、IP68 防水，整体使用寿命延长至 25 年以上，与组件设计寿命匹配。接口采用防腐与抗老化设计，高湿、盐雾、高温环境下，连续 18 个月运行接触电阻波动小于 2%，失效率控制在 0.2%以下。

传统接线盒 5 年失效率达 3.5%，长期运维中，模块化方案减少组件拆卸频次，降低背板老化与电池片应力损伤，发电衰减率较传统方案降低 0.8%/年。青海、越南等电站长期数据验证，其全生命周期运维稳定性与发电收益均优于传统结构。

4 结语

本文完成模块化光伏组件接线盒的结构设计、运维流程制定及效率对比分析，三层分离式架构设计、核心部件优化、防水螺纹式 MC4 插头与接线盒一体化集成及标准化接口设计，解决传统接线盒拆装损伤组件、运维低效的痛点。标准化运维流程与安全规范保障操作安全性与便捷性，对比试验显示，该模块化接线盒在运维效率、组件保护、长期稳定性等方面均优于传统产品，可适配多场景工程应用，与组件设计寿命匹配。

参考文献：

[1] 王立芬,龚馨,彭波,等.光伏组件接线盒致火故障分析与痕迹鉴定方法[J].今日消防,2025,10(07):1-3.

[2] 陈宏月,沈正鸿,薛文娟,等.光伏组件接线盒引线激光焊接的可靠性研究[J].环境技术,2025,43(03):30-36.

[3] 曹敬乐.浅析光伏组件接线盒灌封胶气泡成因及解决思路[J].太阳能,2024,(05):69-75.